

Оптимизация параметров процесса термообработки окатышей на конвейерных машинах

Буткарев А.П., Буткарев А.А., (ОАО «ВНИИМТ»)

Важность решения вопросов математического моделирования и оптимизации параметров различных технологических процессов и агрегатов в настоящее время трудно переоценить. Использование надежных, адекватных математических моделей позволяет сократить время разработки процесса или агрегата, оптимизировать конструктивные и режимные параметры и обеспечить высокие технико-экономические показатели. В области автоматизации без надежного математического обеспечения невозможно решение таких важнейших задач, как косвенные измерения контролируемых параметров технологического процесса, их прогнозирование и, наконец - оптимизация по различным критериям с соответствующими ограничениями.

Использование математических моделей позволяет прогнозировать основные показатели технологического процесса термообработки окатышей на конвейерных машинах, определяющие его экономическую эффективность:

- удельную производительность агрегата ($G_{уд}$);
- удельный расход тепла ($Q_{уд}$);
- удельный расход топлива ($V_{т\ уд}$);
- удельный расход электроэнергии ($\mathcal{E}_{уд}$);
- показатели качества окатышей (прочность, металлургические свойства, химический состав и др.).

Они зависят, главным образом, от конструктивных особенностей агрегата и контролируемых параметров технологического процесса:

- давления (разрежения) в газовоздушных камерах (ГВК) (P_j);
- распределения давления (разрежения) в ГВК;
- температуры теплоносителя (охлаждающего агента) на входе в слой ($t_{гj}$);
- распределения температуры теплоносителя на входе в слой по длине зон;
- температуры воздуха - горения и разбавления (в зонах сжигания топлива);
- коэффициента расхода воздуха - горения и разбавления ($\alpha_{г\ \alpha_p}$);
- высоты слоя окатышей ($H_{сл}$) и донной постели;
- диаметра окатышей слоя ($d_{сл}$) и донной постели;
- порозности слоя окатышей ($\epsilon_{сл}$) и донной постели;
- распределения площади обжиговой машины по технологическим зонам;
- наличия или отсутствия реверсирования теплоносителя в технологических зонах (зона сушки, зона охлаждения);
- наличия или отсутствия переточного коллектора и системы селективного отбора нагретого воздуха (воздуха - разбавления) из зоны охлаждения.

Математическая модель процесса термообработки железорудных окатышей на конвейерных машинах, включающая в себя систему дифференциальных уравнений в частных производных теплообмена в слое между теплоносителем и материалом слоя, уравнение теплообмена между теплоносителем и обжиговой тележкой, уравнения газодинамики и прогнозирования прочности окатышей, расчета удельных расходов топлива и электроэнергии [1-3], позволяет исследовать закономерности технологического процесса в широком диапазоне изменения перечисленных параметров, что совершенно недоступно на реальной обжиговой машине. В свою очередь, знание реальных закономерностей, позволяет оценить влияние различных технологических параметров процесса и, на основе этого, построить наилучшим образом соответствующие алгоритмы оптимизации технологического процесса, а также определить оптимальные конструктивные (соотношение площадей

технологических зон, направление потоков теплоносителя) и режимные параметры, перечисленные выше (температуры, давления газов и т.д.).

Постановки задач оптимизации представлены в общем виде.

Максимизация производительности:

$$G_{уд} \rightarrow \max, \quad (1)$$

при ограничениях в виде равенств и неравенств:

$$\mathcal{E}_{уд} = \mathcal{E}_{уд1} + \mathcal{E}_{уд2} + \dots + \mathcal{E}_{удn} \leq \mathcal{E}_{уд.зад.}; \quad (2)$$

$$Q_{уд} = Q_{уд1} + Q_{уд2} + \dots + Q_{удn} \leq Q_{уд.зад.}; \quad (3)$$

$$V_n \leq V_{но}; \quad (4)$$

$$V_{охл} \leq V_{охл о}; \quad (5)$$

$$t_M = t_M^{зад}(\tau, H); \quad (6)$$

$$\sigma \geq \sigma_{зад}; \quad (7)$$

$$t_{гj}^{нп} \leq t_{гj} \leq t_{гj}^{вп}; \quad (8)$$

$$t_{тел} \leq t_{тел о}; \quad (9)$$

$$S_1 \cdot G_{уд1} = S_2 \cdot G_{уд2} = \dots = S_n \cdot G_{удn} = S_{\Sigma} \cdot G_{уд} = G; \quad (10)$$

$$S_1 + S_2 + \dots + S_n = S_{\Sigma}; \quad (11)$$

$$G_{удi} = G_{удi}(\mathcal{E}_{удi}, Q_{удi}), \quad (12)$$

в свою очередь:

$$\mathcal{E}_{удi} = \mathcal{E}_{удi}(t_{гj}, w_{гj} = w_{гj}(\Delta p_j, \xi, \dots), d_{сл}, H_{сл}, \text{ и т.д.}); \quad (13)$$

$$Q_{удi} = Q_{удi}(t_{гj}, w_{гj} = w_{гj}(\Delta p_j, \xi, \dots), d_{сл}, H_{сл}, \text{ и т.д.}). \quad (14)$$

Минимизация удельного расхода тепла (топлива):

$$Q_{уд} = Q_{уд1} + Q_{уд2} + \dots + Q_{удn} \rightarrow \min., \quad (15)$$

при ограничениях:

$$\mathcal{E}_{уд} = \mathcal{E}_{уд1} + \mathcal{E}_{уд2} + \dots + \mathcal{E}_{удn} \leq \mathcal{E}_{уд.зад.}; \quad (16)$$

$$G_{уд} \geq G_{уд.зад.}; \quad (17)$$

$$V_n \leq V_{но}; \quad (18)$$

$$V_{охл} \leq V_{охл о}; \quad (19)$$

$$t_M = t_M^{зад}(\tau, H); \quad (20)$$

$$\sigma \geq \sigma_{зад}; \quad (21)$$

$$t_{гj}^{нп} \leq t_{гj} \leq t_{гj}^{вп}; \quad (22)$$

$$t_{тел} \leq t_{тел о}; \quad (23)$$

$$S_1 \cdot G_{уд1} = S_2 \cdot G_{уд2} = \dots = S_n \cdot G_{удn} = S_{\Sigma} \cdot G_{уд} = G; \quad (24)$$

$$S_1 + S_2 + \dots + S_n = S_{\Sigma}; \quad (25)$$

$$Q_{удi} = Q_{удi}(\mathcal{E}_{удi}, G_{удi}), \quad (26)$$

в свою очередь:

$$\mathcal{E}_{удi} = \mathcal{E}_{удi}(t_{гj}, w_{гj} = w_{гj}(\Delta p_j, \xi, \dots), d_{сл}, H_{сл}, \text{ и т.д.}); \quad (27)$$

$$G_{удi} = G_{удi}(t_{гj}, w_{гj} = w_{гj}(\Delta p_j, \xi, \dots), d_{сл}, H_{сл}, \text{ и т.д.}). \quad (28)$$

Минимизация удельного расхода электроэнергии:

$$\mathcal{E}_{уд} = \mathcal{E}_{уд1} + \mathcal{E}_{уд2} + \dots + \mathcal{E}_{удn} \rightarrow \min., \quad (29)$$

при ограничениях:

$$G_{уд} \geq G_{уд.зад.}; \quad (30)$$

$$Q_{уд} = Q_{уд1} + Q_{уд2} + \dots + Q_{удn} \leq Q_{уд.зад.}; \quad (31)$$

$$V_n \leq V_{но}; \quad (32)$$

$$V_{охл} \leq V_{охл о}; \quad (33)$$

$$t_M = t_M^{\text{зад}}(\tau, H); \quad (34)$$

$$\sigma \geq \sigma_{\text{зад}}; \quad (35)$$

$$t_{гj}^{\text{нп}} \leq t_{гj} \leq t_{гj}^{\text{вп}}; \quad (36)$$

$$t_{\text{тел}} \leq t_{\text{тел о}}; \quad (37)$$

$$S_1 \cdot G_{\text{уд1}} = S_2 \cdot G_{\text{уд2}} = \dots = S_n \cdot G_{\text{удn}} = S_{\Sigma} \cdot G_{\text{уд}} = G; \quad (38)$$

$$S_1 + S_2 + \dots + S_n = S_{\Sigma}; \quad (39)$$

$$\mathcal{E}_{\text{уди}} = \mathcal{E}_{\text{уди}}(Q_{\text{уди}}, G_{\text{уди}}), \quad (40)$$

в свою очередь:

$$G_{\text{уди}} = G_{\text{уди}}(t_{гj}, w_{гj} = w_{гj}(\Delta p_j, \xi, \dots), d_{\text{сл}}, H_{\text{сл}}, \text{ и т.д.}); \quad (41)$$

$$Q_{\text{уди}} = Q_{\text{уди}}(t_{гj}, w_{гj} = w_{гj}(\Delta p_j, \xi, \dots), d_{\text{сл}}, H_{\text{сл}}, \text{ и т.д.}), \quad (42)$$

где $i=1-n$ - номера технологических зон; j - координаты по длине агрегата; $G_{\text{уд зад}}$, $Q_{\text{уд зад}}$, $\mathcal{E}_{\text{уд зад}}$, $V_{\text{н о}}$, $V_{\text{охл о}}$, $t_{\text{тел о}}$ - ограничения на удельную производительность, удельные расходы тепла (топлива) и электроэнергии, скорости нагрева и охлаждения окатышей, температуру тележки соответственно; $t_M^{\text{зад}}(\tau, H_{\text{сл}})$ - заданное распределение температуры материала; $t_{гj}^{\text{нп}}$, $t_{гj}^{\text{вп}}$ - ограничения по температуре газа на входе в слой (нижний и верхний пределы соответственно); $t_{\text{тел}}$ - температура обжиговой тележки; S_{Σ} , G - площадь и производительность обжиговой машины соответственно; $w_{гj}$ - скорость фильтрации теплоносителя в слое; Δp_j - перепад давления в слое; ξ - коэффициент аэродинамического сопротивления слоя.

Выполнение условий (4-7) позволяет гарантировать необходимое качество окатышей за счет ограничения скоростей нагрева и охлаждения слоя окатышей, а также обеспечения заданной температуры обжига. Условия (8, 9) обеспечивают сохранность огнеупорной футеровки горна и металла обжиговых тележек. Нетрудно также видеть, что условия (10) и (11), могут быть выполнены только в период конструирования обжигового агрегата. При их невыполнении одна из технологических зон будет лимитировать производительность установки. Для устранения такого конструктивного дефекта потребуется ее дорогостоящая модернизация. Из постановок задач (1-42) также следует, что вопросы оптимизации конструктивных и режимных параметров должны решаться комплексно еще на стадии проектирования причем конечные характеристики и показатели работы агрегата будут зависеть, главным образом, от правильного выбора критериев оптимизации и соответствующих ограничений. Таким образом, решение задач оптимизации имеет большое значение как на стадии проектирования, так и на стадии эксплуатации агрегата.

В связи со сложностью процессов, протекающих при термообработке окатышей на конвейерных машинах, обусловленной большим количеством параметров, а также наличием рециклов газовоздушных потоков в теплотехнической схеме агрегата, решение задач оптимизации формализованными методами представляет значительные трудности. Поэтому авторами предложена методика, заключающаяся в том, что весь процесс оптимизации разделяют на этапы. Сначала с использованием математической модели исследуют процессы в отдельных технологических зонах и элементах агрегата, в соответствии с выбранным критерием, оптимизируют их параметры, с учетом соответствующих ограничений, а затем параметры всего агрегата с использованием данных и зависимостей, полученных на первом этапе оптимизации.

Таким образом, для решения перечисленных задач оптимизации необходимо, путем проведения численных экспериментов с помощью математических моделей, исследовать закономерности технологического процесса и определить, с учетом соответствующих ограничений, соответствующие зависимости выходных параметров от входных, как для каждой отдельной технологической зоны, так и для обжиговой машины в целом. Рассмотрим это на примере модернизации обжиговой машины ОК-306 Лебединского ГОКа при решении задачи минимизации удельного расхода электроэнергии.

Для получения достоверных данных по закономерностям технологического процесса проводили адаптацию математической модели с использованием соответствующего алгоритма [4] и опытных данных, полученных в результате промышленных испытаний обжиговой машины ОК-306 №4 Лебединского ГОКа, имеющей реверсивную зону сушки и охлаждения.

Для глубокого и детального исследования процессов, происходящих на обжиговой машине, на первом этапе исследовали и оптимизировали параметры отдельных технологических зон. При этом исходили из того, что, в соответствии с требованиями технологии, каждая зона, в зависимости от ее функционального назначения, должна обеспечивать:

- зоны сушки, нагрева и обжига - заданную среднюю по высоте слоя температуру окатышей на выходе из зоны;
- зона рекуперации - заданную температуру нижних участков слоя;
- зона охлаждения - заданную среднюю по высоте слоя окатышей и донной постели температуру на разгрузке, которая должна быть меньше 100 °С.

На основе опытных данных получено соответствующее распределение температур по высоте слоя на границах технологических зон, а также средняя по массе температура слоя на действующей обжиговой машине ОК-306. Так в конце технологических зон сушки ($S=63 \text{ м}^2$), подогрева ($S=36 \text{ м}^2$), обжига ($S=45 \text{ м}^2$) и охлаждения ($S=135 \text{ м}^2$) средняя температура окатышей составила 88,9, 428,7, 1128,5 и 100 °С соответственно. Температура нижних участков слоя в конце зоны рекуперации ($S=27 \text{ м}^2$) - 1124 °С. Высота слоя донной постели 0,08 м. Высота слоя сырых окатышей 0,32-0,34 м. Диаметр окатышей 0,013 м. Производительность обжиговой машины 292 т/ч.

При проведении численного эксперимента вышеназванные температуры на границах зон (ограничения) поддерживали постоянными при изменении исследуемых параметров путем корректировки производительности зоны (при постоянном давлении в ГВК) или давления в ГВК (при постоянной производительности).

По результатам расчетов для каждой зоны определяли зависимости основных показателей процесса $\dot{E}_{уд}$, $V_{т\text{уд}}$, $Q_{уд}$, $G_{уд}$ как функции от исследуемого параметра (аналогичные показанным на рис. 1), а также графики $\dot{E}_{удi}=f_i(G_{удi})$ (рис. 2), исходя из которых находили оптимальную величину параметров.

Анализ работы зоны сушки показал, что существующая двухсекционная реверсивная зона сушки обжиговой машины ОК-306 отличается сравнительно низкими показателями [3]:

- малой удельной производительностью;
- высоким удельным расходом электроэнергии на транспортировку теплоносителя через слой и уплотнения (продувы и подсосы);
- высокими удельными расходами теплоносителя и тепла на технологический процесс сушки.

Для улучшения показателей работы зоны сушки необходимо:

- оптимизировать соотношение длин (площадей) секции с продувом и просасыванием теплоносителя через слой, минимизировав длину (площадь) первой секции, сократив ее, по крайней мере, с 5 до 3 ГВК, а вторую секцию увеличить с 2 до 4 ГВК;
- вести процесс сушки с максимально возможными температурами теплоносителя на входе в слой.

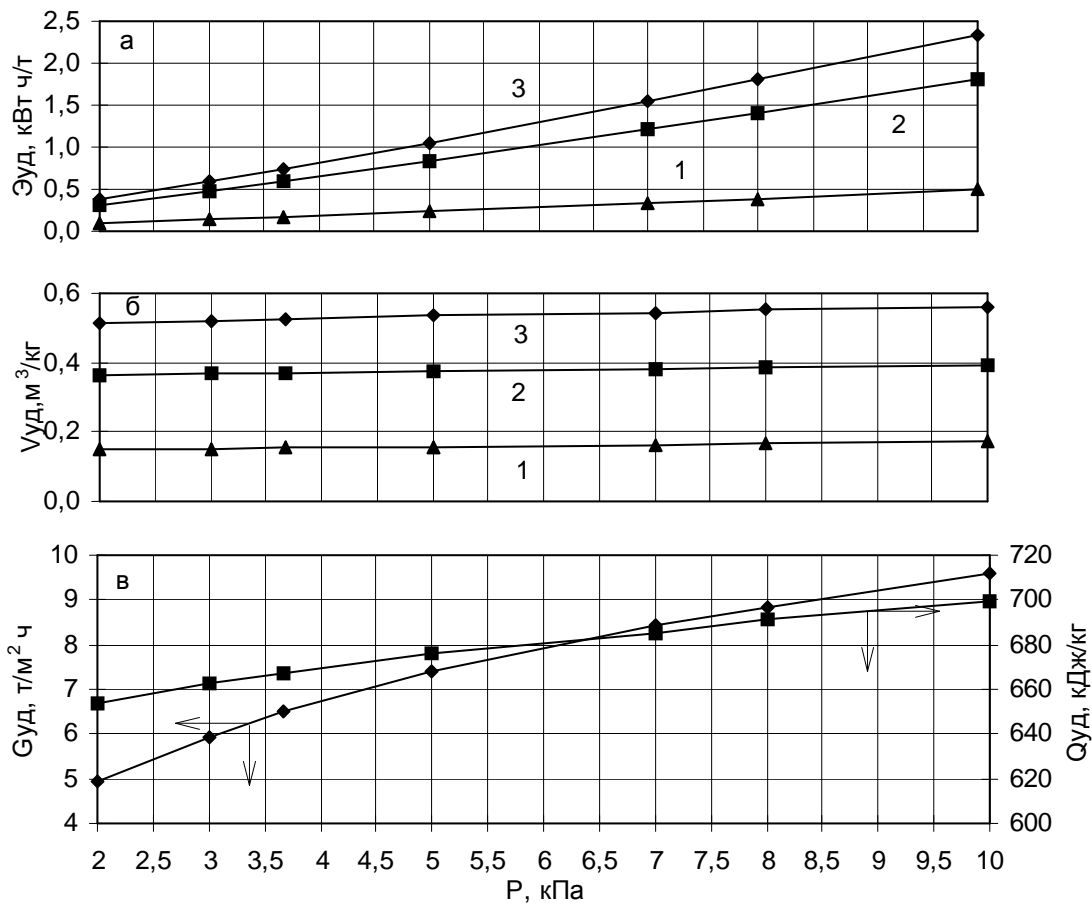


Рис. 1. Изменение удельных расходов электроэнергии ($\text{Э}_{\text{уд}}$), теплоносителя ($V_{\text{уд}}$), тепла ($Q_{\text{уд}}$), а также удельной производительности ($G_{\text{уд}}$) зоны обжига в зависимости от разрежения в ГВК (P): 1-подсосы; 2-тележка; 3-тележка+подсосы.

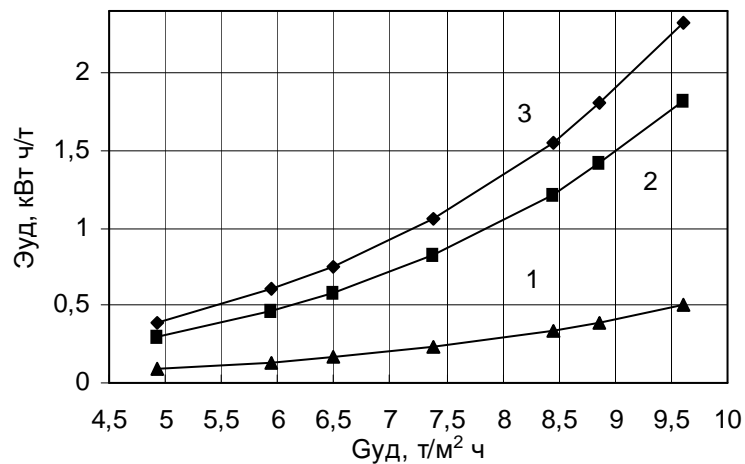


Рис. 2. Изменение удельного расхода электроэнергии ($\text{Э}_{\text{уд}}$) в зависимости от удельной производительности ($G_{\text{уд}}$) зоны обжига при изменении разрежения в ГВК: 1- подсосы; 2- тележка; 3-тележка+подсосы.

Проведенные численные эксперименты позволили также сделать ряд выводов и дать общие рекомендации по ведению технологического процесса в зонах нагрева:

- Во всех технологических зонах нагрева слоя окатышей (сушка, подогрев, обжиг, рекуперация) тепловая, электрическая экономичность и удельная производительность процесса возрастают с ростом температуры теплоносителя на

входе в слой. Поэтому при оптимизации технологического процесса по этим критериям необходимо поддерживать максимально возможные температуры.

- Удельный расход топлива в зоне обжига определяется, кроме температуры в зоне, температурами воздуха горения и разбавления а также коэффициентом расхода воздуха горения. При постоянной удельной производительности зоны обжига ($6,49 \text{ т/м}^2 \text{ ч}$), повышение температуры воздуха разбавления с 750 до $850 \text{ }^\circ\text{C}$ приводит к экономии $1,5 \text{ м}^3$ природного газа на тонну окатышей, а повышение температуры воздуха горения со 150 до $350 \text{ }^\circ\text{C}$ (при $\alpha=1$) экономит $0,8 \text{ м}^3$ газа/т. В то же время, уменьшение коэффициента расхода воздуха горения (α) с $1,0$ до $0,2$ приводит к экономии $1,8\text{-}2,0 \text{ м}^3$ газа/т. Последнее можно реализовать путем установки в зоне обжига инжекционных горелок вместо существующих двухпроводных. Результаты численного эксперимента подтверждают целесообразность реализации селективного отбора воздуха разбавления для зоны обжига из наиболее высокотемпературной части зоны охлаждения, при котором возможно повышение его температуры до $1150 \text{ }^\circ\text{C}$. В исследованном практическом диапазоне изменения параметров удельный расход топлива непрерывно снижается с увеличением высоты слоя и возрастает с увеличением диаметра окатышей. Увеличение высоты слоя с $0,3$ до $0,4 \text{ м}$ приводит к экономии $1,0 \text{ м}^3$ газа/т, а уменьшение диаметра окатышей с $0,013 \text{ м}$ до $0,011 \text{ м}$ - на $0,6 \text{ м}^3$ газа/т, поэтому целесообразно поддерживать повышенную высоту слоя. С ростом разрежения в ГВК удельный расход топлива увеличивается, поэтому в зонах его сжигания необходимо поддерживать умеренные разрежения (скорости фильтрации).
- Для снижения удельного расхода электроэнергии на термообработку окатышей целесообразно вести процесс при умеренных разрежениях (давлениях) в ГВК (порядка $3\text{-}4 \text{ кПа}$). В то же время, следует учитывать наличие минимума по расходу электроэнергии в зависимости от таких параметров как диаметр окатышей и высота слоя. Порозность слоя целесообразно увеличивать путем совершенствования одним из способов [5] укладки слоя сырых окатышей и оптимизации их гранулометрического состава. С точки зрения экономии электроэнергии существует оптимальное распределение давлений и разрежений в ГВК зон нагрева, при котором удельный расход электроэнергии минимален.

Исследования зоны охлаждения показали, что:

- Реверсирование охлаждающего воздуха в зоне охлаждения приводит к увеличению средней температуры окатышей на разгрузке, причем, чем больше доля участка с прососом охлаждающего воздуха, тем ниже эффективность охлаждения.
- Реализация реверсивной схемы охлаждения приводит к значительному увеличению удельных расходов воздуха и электроэнергии на охлаждение окатышей, к значительному снижению удельной производительности зоны охлаждения и усложнению теплотехнической схемы агрегата, поэтому (с учетом сказанного выше) она не может быть рекомендована к практической реализации.
- Вести процесс охлаждения окатышей целесообразно при умеренных давлениях в дутьевых камерах ($3\text{-}4 \text{ кПа}$) при которых обеспечивается достаточно высокая удельная производительность ($2,7\text{-}3,0 \text{ т/м}^2 \text{ ч}$) и относительно невысокий удельный расход электроэнергии. Повышение давления до $6,6 \text{ кПа}$ приводит к увеличению удельной производительности на 27% , однако удельный расход электроэнергии увеличивается при этом на 94% .
- Дутьевой режим в камерах зоны охлаждения необходимо вести таким образом, чтобы давления во всех камерах были либо одинаковыми, либо в первой секции были выше, чем во второй. Оптимальное, с точки зрения минимума удельного расхода электроэнергии на охлаждение, соотношение давлений в первой и второй секциях находится в диапазоне от $1,0$ до $2,1$. Это обеспечивает минимальный

удельный расход электроэнергии на охлаждение окатышей. Причем эта закономерность сохраняется при различном соотношении камер в первой и второй секциях;

- На эффективность процесса охлаждения большое влияние оказывает температура охлаждающего воздуха. Так, например, при повышении температуры с 20 до 80 °С удельная производительность зоны охлаждения снижается на 23%, а удельный расход электроэнергии увеличивается на 47%. Если же при этом удельную производительность зоны поддерживать постоянной за счет увеличения давления воздуха (его расхода), то удельный расход электроэнергии увеличится на 124% (в 2,24 раза). Таким образом, даже естественные изменения температуры наружного воздуха (диапазон от -30 до +30 °С), которые в настоящее время на практике не учитываются, приводят к существенным изменениям показателей процесса охлаждения.
- При использовании сбросного нагретого воздуха (газов) с температурой 180-350 °С в зоне охлаждения, с целью утилизации тепла, следует учитывать, что подача нагретого воздуха всегда приводит к увеличению удельного расхода электроэнергии. Поэтому целесообразность использования нагретого воздуха должна рассматриваться на основе сопоставления дополнительных затрат электроэнергии и ожидаемой экономии топлива. С целью минимизации энергозатрат необходимо следовать следующим принципам:
 - нагретый воздух необходимо подавать на начальном участке зоны охлаждения, причем относительная площадь этого участка должна быть минимальной;
 - с увеличением температуры нагретого воздуха относительную площадь секции с его подачей следует уменьшать;
 - перед подачей нагретого воздуха в зону охлаждения разбавлять его атмосферным воздухом нецелесообразно;
 - учитывать, что подача в конце зоны охлаждения даже низконагретого воздуха ($t=60-80$ °С) всегда вредна;
- При различной средней температуре слоя на входе в зону охлаждения (диапазон 1075-1175 °С), но одинаковой температуре на границе “слой-постель”, (1164 °С) удельная производительность зоны, скорость фильтрации газов в слое и удельный расход электроэнергии изменяются незначительно. Однако, с ростом средней температуры слоя возрастает температура воздуха на выходе из него в первой секции и практически не изменяется во второй. В то же время, при одинаковой средней температуре слоя, но более высокой в нижних участках существенно ухудшаются все показатели процесса охлаждения;
- Зависимость удельной производительности зоны охлаждения от высоты слоя носит экстремальный характер, а удельный расход воздуха на охлаждение и электроэнергии, в исследованном диапазоне высот слоя (0,3-0,8 м), уменьшается с увеличением высоты слоя. Последнее связано с увеличением завершенности теплообмена в слое с увеличением его высоты. С увеличением порозности слоя с 0,28 до 0,32 и 0,36 оптимальная высота слоя увеличивается, соответственно с 0,4 до 0,5 и 0,6 м. Учитывая, что на практике порозность слоя в зоне охлаждения находится в диапазоне 0,3-0,32, то ей соответствует оптимальная, с точки зрения удельного расхода электроэнергии, высота слоя 0,45-0,5 м;
- Порозность слоя оказывает решающее влияние на все показатели процесса охлаждения. При постоянном давлении в дутьевых камерах увеличение порозности слоя приводит к увеличению удельной производительности зоны охлаждения и удельного расхода воздуха на охлаждение. Удельный расход электроэнергии при этом практически не изменяется. При постоянной удельной

производительности зоны охлаждения даже незначительное увеличение порозности слоя приводит к существенному уменьшению удельного расхода электроэнергии;

- При постоянной производительности зоны охлаждения, зависимость удельного расхода электроэнергии от диаметра окатышей носит экстремальный характер с минимумом в диапазоне диаметров 14-16 мм. Удельный расход воздуха на охлаждение с увеличением диаметра непрерывно увеличивается, а необходимое давление в дутьевых камерах уменьшается.

На основе полученных закономерностей и подробного исследования каждой зоны (сушки, подогрева, обжига, рекуперации, охлаждения) в отдельности, разработаны предложения по модернизации и оптимизации параметров отдельных технологических зон обжиговой машины (табл.) без изменения их площади, с целью снижения удельного расхода электроэнергии. При этом площадь первой секции зоны сушки уменьшена с 45 до 27 м², в зоне охлаждения исключен реверс охлаждающего агента, оптимизированы параметры технологического процесса (давления, температуры). В результате первого этапа оптимизации (оптимизация параметров зон) удельный расход электроэнергии на фильтрацию слоя и подсосы (продувы) снижен на 42% (с 10,55 до 6,1 кВт ч/т).

На втором этапе оптимизации решена задача минимизации удельного расхода электроэнергии для агрегата в целом.

Постановка задачи (3.29-3.42) в этом случае принимает вид:

Требуется найти вектор (S_1, S_2, \dots, S_n) так, чтобы

$$\mathcal{E}_{уд} = \mathcal{E}_{уд1} + \mathcal{E}_{уд2} + \dots + \mathcal{E}_{удn} \rightarrow \min, \quad (43)$$

при ограничениях:

$$G_{уд} \geq G_{уд.зад.}; \quad (44)$$

$$V_n \leq V_{н о}, V_{охл} \leq V_{охл о}, t_{mi} = t_{mi}^{зад} (\sigma \geq \sigma_{зад}); \quad (45)$$

$$t_{rj}^{нп} \leq t_{rj} \leq t_{rj}^{вп}; \quad (46)$$

$$t_{тел} \leq t_{тел о}; \quad (47)$$

$$S_1 \cdot G_{уд1} = S_2 \cdot G_{уд2} = \dots = S_n \cdot G_{удn} = S_{\Sigma} \cdot G_{уд} = G; \quad (48)$$

$$S_1 + S_2 + \dots + S_n = S_{\Sigma}; \quad (49)$$

$$\mathcal{E}_{удi} = f_i(G_{удi}), \quad (50)$$

причем ограничения (45-47) уже учтены на первом этапе оптимизации. Здесь t_{mi} , $t_{mi}^{зад}$ - температуры материала на выходе из i технологической зоны текущая и заданная соответственно.

Задачу решали методом покоординатного спуска [6] для зон подогрева, обжига, рекуперации и охлаждения с использованием полученных зависимостей $\mathcal{E}_{удi} = f_i(G_{удi})$ (см. рис.2).

Решение задачи позволило оптимизировать, в соответствии с выбранным критерием (минимум удельного расхода электроэнергии), площади, давления (разрежения) и, соответственно, удельные производительности каждой технологической зоны (см. табл.) и снизить удельный расход электроэнергии на 51% по сравнению с базовым распределением.

Анализ этих данных показывает, что для оптимального, с точки зрения минимума удельного расхода электроэнергии, распределения площади зон подогрева, обжига и рекуперации необходимо увеличить, а площадь зоны охлаждения уменьшить со 135 до 105,6 м², так как после модернизации (исключения реверсирования газового потока) она будет иметь большой резерв по производительности. Давления (разрежения) в ГВК зоны охлаждения, при этом, должны быть увеличены, а в зонах нагрева, наоборот, уменьшены.

Полученные данные относятся к "чистому" (теоретически необходимому) удельному расходу электроэнергии, необходимому на фильтрацию газов через слой и уплотнения ГВК. Фактический расход будет больше в зависимости от КПД тягодутьевых установок (ТДУ), который на практике изменяется от 0,72 до 0,80.

Таблица

Базовые и рекомендуемые параметры обжиговой машины

Название зоны	Параметры обжиговой машины ОК-306											
	Базовые				При модернизации зон (первый этап оптимизации)				При оптимизации агрегата (второй этап оптимизации)			
	$S_i,^{1)}$ м ²	$G_{уд},^{1)}$ т/м ² ч	$P, \text{кПа}^{1)}$	$\mathcal{E}_{уд},^{2)}$ кВт ч/т	$S_i,^{1)}$ м ²	$G_{уд},^{1)}$ т/м ² ч	$P, \text{кПа}^{1)}$	$\mathcal{E}_{уд},^{2)}$ кВт ч/т	$S_i,^{1)}$ м ²	$G_{уд},^{1)}$ т/м ² ч	$P, \text{кПа}^{1)}$	$\mathcal{E}_{уд},^{2)}$ кВт ч/т
Сушка	45/18	4,63	6,3/-3,7	3,2	27/36	4,63	6,3/-3,7	2,17	27/36	4,63	6,3/-3,7	2,17
Подогрев	36	8,11	-3,7	0,77	36	8,11	-3,7	0,77	45,48	6,42	-2,01	0,41
Обжиг	27/18	6,49	-3,7/-7,5	1,4	45	6,49	-3,67	0,75	49,25	5,93	-2,99	0,60
Рекуперация	27	10,81	-7,5	1,6	27	10,81	-7,50	1,60	42,67	6,84	-3,05	0,61
Охлаждение	81/64	2,16	3,02/-5,8	3,58	135	2,16	1,86	0,82	105,6	2,77	3,17	1,41
Машина в целом	306	0,95		10,55	306	0,95		6,11	306	0,95		5,20

Примечания: 1. Числитель - первая, знаменатель - вторая секция.

2. На фильтрацию слоя и подсосы (продувы) при КПД 100%.

Кроме того, в целом по машине, удельный расход увеличивается за счет потерь напора, создаваемого ТДУ, в трубопроводах, газоочистках, за счет вредных подсосов и т.д. Анализ результатов промышленных испытаний показал, что удельный расход электроэнергии на привод технологических ТДУ обжиговой машины ОК-306 составляет 37,9 кВт ч/т. При этом, на транспортировку газов по газовоздушным трактам теряется 23,2 кВт ч/т электроэнергии.

Следует отметить, что полученные оптимальные конструктивные и режимные параметры в процессе эксплуатации обжиговой машины будут изменяться в связи с изменением характеристик слоя окатышей и донной постели (влажность, диаметр, гранулометрический состав и др.) поэтому они должны корректироваться путем реализации соответствующих алгоритмов управления технологическим процессом.

В полном объеме предлагаемые оптимальные параметры могут быть реализованы только при создании новой обжиговой машины, так как при модернизации действующей приходится учитывать конкретные условия производства. Так, например, не всегда и не во всех зонах удастся перераспределить их площади оптимальным образом в связи с тем, что приходится использовать существующие газоходы, горелочные устройства, средства регулирования газопотоков и высоконапорные дымососы. Иногда в цехе нет места для установки дополнительного оборудования или невозможно установить в нужном месте существующее (например, дымососы). Однако, даже частичная реализация предлагаемых мероприятий, как правило, дает существенный эффект.

Таким образом, создание обжиговых агрегатов с учетом вышеизложенного позволяет, уже на стадии проектирования агрегата заложить оптимальную, в соответствии с выбранным критерием (например минимум удельного расхода электроэнергии), структуру и, тем самым, получить наибольший экономический эффект, чем в случае оптимизации только режимных параметров (их количество ограничено) в рамках ограничений, заложенных в структуру агрегата при его проектировании. Даже при неудачном выборе структуры агрегата, оптимизация режимных параметров всегда позволяет получить экономический эффект, однако это не устраняет ошибок проектирования в результате чего не будет обеспечена максимальная экономия энергоресурсов.

Следовательно, наибольший экономический эффект можно получить лишь сочетая оптимизацию конструктивных параметров при проектировании агрегата и оптимизацию технологических параметров во время его эксплуатации.

В заключение следует отметить, что применение математических моделей в период эксплуатации агрегата позволяет реализовать ряд задач, результаты которых существенно облегчают условия труда персонала, ведущего технологический процесс. При этом появляется возможность предоставлять оператору информацию, недоступную для непосредственного измерения (косвенные измерения); рассчитывать, с использованием модели в контуре обратной связи, управляющее воздействие при стабилизации отдельных технологических параметров; решать задачи оптимизации по выбранным критериям с соответствующими ограничениями, при заданном качестве выпускаемого продукта. В случае оптимизации статического режима, с помощью математической модели в темпе с процессом определяют задания локальным регуляторам, которые автоматически корректируются при изменении технологической ситуации. При использовании математических моделей для решения задач в период эксплуатации агрегата, всегда необходимо в полной мере учитывать как особенности технологического процесса, так и возможности автоматизированной системы управления, в рамках которой реализована математическая модель и алгоритмы управления технологическим процессом.

Заключение

Разработана методика исследования технологического процесса термообработки окатышей с целью получения исходных данных для оптимизации его конструктивных и режимных параметров.

Осуществлена обобщенная постановка задач оптимизации параметров процесса термообработки окатышей на конвейерных машинах по различным критериям (максимум производительности, минимум удельного расхода тепла (топлива), минимум удельного расхода электроэнергии) при соответствующих ограничениях в виде равенств и неравенств.

Предложена и реализована, на примере минимизации удельного расхода электрической энергии на обжиговой машине ОК-306 Лебединского ГОКа, методика решения поставленных задач оптимизации.

Наши координаты

ОАО «Научно-исследовательский институт металлургической теплотехники»
(ОАО «ВНИИМТ»)

620137, г. Екатеринбург, ул. Студенческая, д. 16

Буткарев Алексей Анатольевич

Тел./факс: +7 343 383 75 81

Skype: ButkarevAlexey

butkarev@yandex.ru

04.2000 г.

Литература

1. Математическая модель процессов теплообмена при обжиге окатышей / Буткарев А.П., Майзель Г.М., Малкин В.М. и др. // Научные основы построения АСУ ТП окускования сыпучих материалов. - Киев, Наукова думка. 1980. - С.107-118.
2. Математическое обеспечение АСУ ТП производства железорудных окатышей на конвейерных машинах / Буткарев А.П., Майзель Г.М., Некрасова Е.В., Буткарев А.А. // Сталь. - 1995. - № 4. - С. 67-75.
3. Буткарев А.А. Разработка и применение математических моделей и алгоритмов для исследования и оптимизации параметров непрерывного технологического процесса с плотным фильтруемым слоем на примере производства железорудных окатышей. - Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. - Екатеринбург. - 1998. - 211с.
4. Эффективный способ адаптации математической модели при моделировании процесса обжига окатышей на конвейерной машине / Буткарев А.П., Сквирский Е.С., Некрасова Е.В., Козырев П.И. // Теплотехническое обеспечение основных технологических процессов черной металлургии. М.: Металлургия, 1988. - С. 3-12.
5. Исследование процесса загрузки окатышей на обжиговую машину типа ОК-228 / Дегодя В.Я., Леушин В.Н., Обвинцев В.И. и др. // Сталь. - 1995. - № 4. - С. 18-20.
6. Калиткин Н.Н. Численные методы // под ред. А.А. Самарского / М.: Наука, 1978. - 512 с.